

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.865.8; 681.51

Дмитрий Николаевич Аксаментов

ФГБОУВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Россия, Иркутск, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете

Авторское резюме

Состояние вопроса. В современном мире грузоподъемные краны широко применяются в различных сферах промышленной деятельности, многие из них используют подвесное крепление груза, что сопряжено с его колебанием во время транспортировки. Раскачивание груза чаще всего возникает при ускорении или торможении тележки крана, реже – из-за внешних возмущений, например воздействия ветра. Одно из основных направлений развития такого рода кранов является создание автоматизированной системы управления, способной гасить маятниковые колебания груза. В настоящее время предложено немало количество систем управлений, однако большинство из них требует предварительной настройки под конкретные параметры переносимого груза. Задачей настоящего исследования является создание и отладка алгоритма управления на макете мостового крана ранее разработанного адаптивного закона управления, способного обеспечить точное позиционирование и гашение колебаний груза в условиях текущей параметрической неопределенности. Исследование на экспериментальной установке позволит определить и разобрать особенности внедрения закона управления перед его применением на промышленных кранах.

Материалы и методы. Адаптивный закон управления в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений исследуется на макете мостового крана. Данный метод управления основан на схеме адаптивного управления с идентификатором и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости.

Результаты. Описаны ранее разработанный адаптивный закон управления мостовым краном и экспериментальная установка мостового крана. Разработан алгоритм адаптивного управления макетом мостового крана. Представлены результаты первых экспериментальных исследований предлагаемого способа управления, которые подтверждают его работоспособность в реальных условиях.

Выводы. Результаты опытных испытаний показывают эффективность адаптивного закона управления. Система обеспечивает точное перемещение груза за малый промежуток времени, демпфирует маятниковые колебания груза при разгоне и торможении тележки, а также при внешних возмущениях. Адаптивный закон управления позволяет перемещать груз в назначенное положение и гасить маят-

никовые колебания при минимальной предварительной настройке системы управления. На качестве управления практически не сказывается изменения параметров груза и длины подвеса, поскольку идентификация параметров происходит в текущем времени.

Ключевые слова: мостовой кран, маятниковые колебания, адаптивный закон управления, эталонная модель, алгоритм текущей идентификации

Dmitriy Nikolayevich Aksamentov

Irkutsk State Transport University, Postgraduate student of Automation of Production Processes Department, Russia, Irkutsk, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Study of adaptive control law of overhead crane using its model

Abstract

Background. Nowadays, cargo cranes are widely used in various areas of industries. Many of cranes use suspended load fastening, which is associated with load swinging during transportation. Load swinging is most often caused by acceleration or deceleration of the crane trolley, less often it occurs due to external disturbances, such as wind. One of the key directions of the development of this kind of cranes is the development of an automated control system that can dampen pendular oscillations of the load. At present, a considerable number of control systems have been developed, but most of them require preset adjustment of specific parameters of the transported load. The task of this study is to develop and debug a control algorithm using a model of an overhead crane of previously developed adaptive control law that can provide fine positioning and damping of load oscillations under the current parametric uncertainty. The study using the pilot plant will allow us to determine and analyze the features of the implementation of the control law before its application for industrial cranes.

Materials and methods. An adaptive control law is studied using the model of overhead crane under conditions of a current parametric uncertainty of the load and external disturbances. This control method is based on an adaptive control approach with an identifier and an implicit reference model using “simplified” adaptation conditions.

Results. A previously developed adaptive control law for an overhead crane is described. An experimental model of an overhead crane is described. An algorithm for adaptive control of an overhead crane model has been developed. The first experimental studies of the proposed control method have been carried out. They confirm its performance in real conditions.

Conclusions. The results of experimental tests have shown the effectiveness of the adaptive control law. The system ensures fine motion of the load in a short period of time, dampens the pendular oscillations of the load during acceleration and deceleration of the trolley, as well as during external disturbances. The adaptive control law allows you to move the load to the designated position and dampen the pendular oscillations with minimal preset adjustment of the control system. Since the identification of parameters occurs at the current time, the changes of the parameters of the load and the length of suspension do not affect the quality of control.

Key words: overhead crane, adaptive control law, pendular oscillations, reference model, current identification algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.047-057

Введение. При эксплуатации грузовых кранов с подвесным креплением груза, в частности мостовых кранов, зачастую возникают трудности в управлении из-за раскачивания транспортируемого груза. Колебания груза могут возникать по разным причинам: ускорение или торможение тележки, неровности подкранового пути, воздействие ветра. Все эти факторы могут в значительной мере повлиять на точность позиционирования, качество, эффективность управления и безопасность эксплуата-

ции крана. Многие исследования способов управления крановыми системами направлены на минимизацию угла качания переносимого груза и обеспечение его перемещения в желаемое положение за наименьший промежуток времени [1–9]. Известен метод, в основе которого лежит обычное релейное управление приводом [1]. Период разгона тележки крана разбивается на три этапа с различными ускорениями, что позволяет выйти на режим максимальной скорости перемещения с

минимальным углом отклонения груза от вертикальной прямой. Есть решение этой задачи [2], основанное на использовании ПИД-регулятора, который обеспечивает плавный разгон и торможение при хорошо настроенных коэффициентах, что для разных условий обеспечить трудно. В [3] представлена двухконтурная система управления с ПИД-регулированием: в первом контуре обеспечивается гашение колебаний груза, а во втором решается задача перемещения груза в заданное место. В [4] описан модернизированный ПД-регулятор с сигмоидальной функцией. В [5–6] демпфирование колебаний достигается за счет управления с нечеткой логикой. В [7] используется ПД-регулятор с самонастраивающимся коэффициентом усиления посредством нейронной сети. В [8] предложена комбинация нейронной сети и управления скользким режимом. Управление скользким режимом использовано в качестве алгоритма самонастройки в целях определения необходимых параметров. Известен способ [9] адаптивной системы управления с идентификационным алгоритмом, с помощью которого в начальный момент времени оцениваются параметры крана, затем строится управление на основе использования функции Ляпунова. Однако использование ПИД-регуляторов подразумевает предварительную настройку системы под заранее известные параметры. В [9] параметры оцениваются заранее только перед перемещением груза, что может отрицательно сказаться на качестве переходного процесса. Управление с нечеткой логикой не всегда справляется с «нештатными» ситуациями и всем спектром возмущений, что наглядно представлено в [10], где на имитационной компьютерной модели исследовались три способа управления мостовым краном: управление с ПИД-регулированием, управление с нечеткой логикой и способ адаптивного управления [11].

Ниже исследуется адаптивный закон управления мостовым краном, основная цель которого минимизировать колебания груза как от собственного возбуждения при ускорении и торможении крана, так и при внешних возмущениях на систему (ветер,

неровности подкранового пути и т.д.) в условиях текущей параметрической неопределенности. Испытания системы на экспериментальной установке позволяет проверить работоспособность закона управления на реальном объекте управления с учетом всех факторов, присущих реальной эксплуатации крана, которые достаточно сложно предусмотреть при аналитическом моделировании.

Описание объекта управления.

Математическое описание рассматриваемого объекта управления с перемещением груза по одной оси хорошо изучено в [12]. Схема движения тележки крана и линейного перемещения подвешенного груза представлена на рис. 1, где m_1 – масса тележки; $V_{\text{упр}} = V = \dot{x}$ – скорость перемещения тележки (она же – управляющий сигнал); $f_{\text{упр}}$ – управляющая сила; $f_{\text{тр}}$ – сила трения, действующая на тележку; m_2 – масса груза; J – центральный момент инерции; $f_{\text{вн}}$ – горизонтальное внешнее возмущение, действующее на груз; l – длина гибкой подвески, с помощью которой груз связан с тележкой; ϕ – угол отклонения троса от вертикальной оси; $x_{\text{гр}}$ – координата перемещения груза по оси X .

Если считать управляющим воздействием силу привода, то уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка–маятник» без учета массы троса и трения углового движения (в силу их малости) и без учета начальных значений переменных по положению и скорости имеют следующий вид [12]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + (m_2 l \cos \phi) \ddot{\phi} = \\ = f_{\text{упр}} + m_2 l \dot{\phi}^2 \sin \phi - k_x \dot{x} - f_{\text{с.тр}}, \\ (m_2 l \cos \phi) \ddot{x} + (m_2 l^2 + J) \ddot{\phi} = \\ = -m_2 g l \sin \phi - l f_{\text{вет}} \cos \phi, \\ x_{\text{гр}} = x + l \sin \phi, \end{cases} \quad (1)$$

где k_x – коэффициент вязкого трения поступательного перемещения тележки; $f_{\text{тр}}$ – сила сухого трения; g – ускорение свободного падения (указанные производные переменных взяты по времени (t)); перечисленные выше параметры крана являются переменными и заранее неизвестными, кроме параметров g , m_1 и $m_{1\text{max}}$.

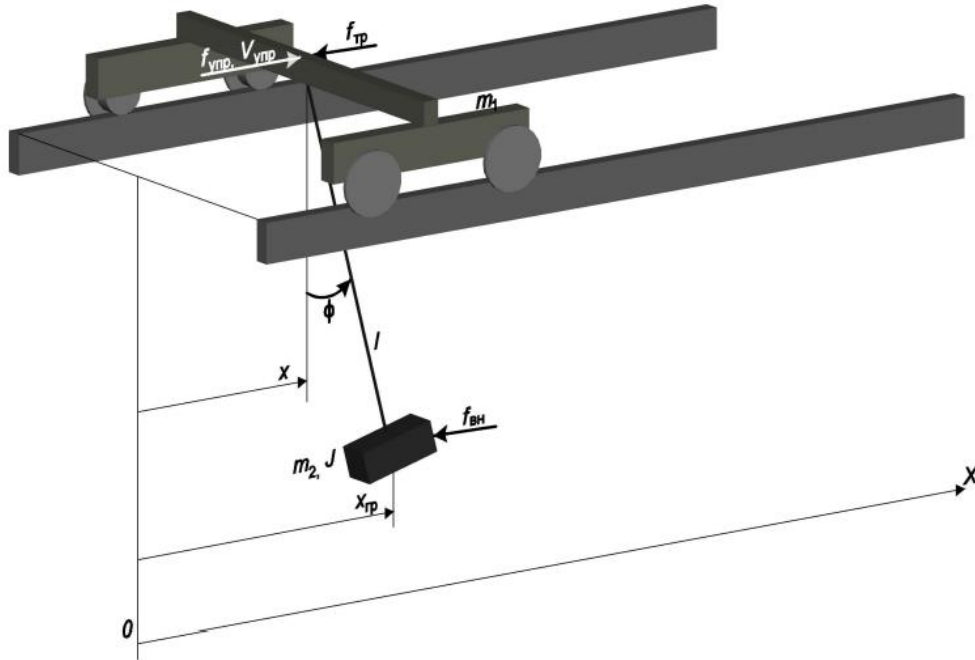


Рис. 1. Схема перемещения груза по одной оси

Поскольку угол отклонения груза от вертикальной прямой невелик ($|\phi| < 30^\circ$), так же как и угловая скорость, примем следующие упрощения: $\sin\phi \approx \phi$, $\cos\phi \approx 1$, $\dot{\phi}^2 \sin\phi \approx 0$. При этом система (1) переписывается относительно переменных \ddot{X} , $\ddot{\phi}$, $x_{гр}$ в следующем виде:

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{упр} + a_{x2} \phi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}, \\ \ddot{\phi} \approx a_{\phi1} f_{упр} + a_{\phi2} \phi + a_{\phi3} \dot{x} + a_{\phi4}, \\ x_{гр} \approx x + l\phi, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_{x1} = \gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)$; $a_{x2} = \gamma^{-1}g(m_2 l^2)$;

$$a_{x3} = -\gamma^{-1}(m_2 l^2 + J) k_x;$$

$$a_{x4} = \gamma^{-1}[-(m_2 l^2 + J)f_{с.тр} + m_2 l^2 f_{вет}];$$

$$a_{\phi1} = -\gamma^{-1}m_2 l; \quad a_{\phi2} = -\gamma^{-1}(m_1 + m_2)m_2 g l;$$

$$a_{\phi3} = \gamma^{-1}m_2 l k_x;$$

$$a_{\phi4} = \gamma^{-1}l[m_2 f_{с.тр} - (m_1 + m_2)f_{вет}];$$

$$\gamma = [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2)J].$$

Из последнего равенства системы (2) на основании первых двух получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой [11]:

$$\ddot{x}_{гр} \approx a_1 f_{упр} + a_2 \phi + a_3 \dot{x} + a_4. \quad (3)$$

Для вывода уравнения динамики перемещения груза в зависимости от скорости

тележки из первой зависимости системы (2) выразим значение $f_{упр}$ и подставим его в (3), с учетом $(a_3 - a_1 a_{x3}/a_{x1}) = 0$ получим

$$\ddot{x}_{гр} \approx a_1^V \dot{V} + a_2^V \phi + a_3^V, \quad (4)$$

где $a_1^V = a_1/a_{x1} = J/(J + m_2 l^2)$, $1 \geq a_1^V > 0$;

$$a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2}/a_{x1}); \quad a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4}/a_{x1}).$$

Далее это уравнение будем использовать в качестве объекта управления.

Закон управления. В соответствии с [13], в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта [12]:

$$\ddot{x}_m = a_{m1} \dot{x}_m + a_{m0} (x_m - x_{гр}^{зад}), \quad x_m(t_0) = x_{гр}(t_0), \quad (5)$$

где x_m – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ; $x_{гр}^{зад}$ – заданное значение $x_{гр}$; $a_{m1} = -2\xi_m \omega_m$,

$a_{m0} = -(\omega_m)^2$ – выбираемые параметры эталонной модели; $\xi_m > 0$ – эталонное значение относительного коэффициента затухания;

$\omega_m = 0,5\sqrt{g/\hat{l}_{30\%}} > 0$ – эталонное значение собственной частоты; $\hat{l}_{30\%}$ – оценка длины подвеса груза с погрешностью не более $\pm 30\%$ [11]; t_0 – начальный момент времени.

Если правая часть уравнения (4) описывается в соответствии с назначенным эталоном (5), то в силу принятых условий и (2) поведение объекта будет близко к поведению эталонной модели:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \cong a_{\text{м1}} \dot{x}_{\text{гр}} + a_{\text{м0}} (x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}). \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (4) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя $\dot{x}_{\text{гр}}$ на \dot{x} , чтобы устранить внутреннюю неустойчивость [13], определяем идеальную управляющую скорость $V_{\text{упр}}$, вычисленную при точных значениях параметров объекта:

$$\begin{aligned} T \dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = \\ = -a_{\text{м1}}^{-1} [a_{\text{м0}} (x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - a_2^V \phi - a_3^V], \end{aligned} \quad (7)$$

где $T = -a_1^V / a_{\text{м1}}$.

Полученный закон управления (7) построен при условии, что параметры объекта управления (a_1^V, a_2^V, a_3^V) известны. Однако на практике они будут неопределенны. Для поиска оценок указанных параметров в (4) в текущем времени используем алгоритм идентификации, способный оценивать переменные по времени, – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [15]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}, \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1}] / \beta, \\ P_0 = \vartheta E_2, \quad \beta < 1, \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (8)$$

где индекс $i = 1, 2, 3 \dots$ – дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$ – вектор искомых оценок; верхний индекс T – транспонирование; $y_i = [\phi_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i – невязка идентификации; z_i – отклик объекта (в данном случае $z_i = (\ddot{x}_{\text{гр}} - \hat{a}_1^V \dot{V})$); оценка \hat{a}_1^V будет назначаться постоянной в силу свойств замкнутой адаптивной системы управления, построенной на «упрощенных» условиях адаптируемости [13]; P_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2); β – назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимся во времени искомыми параметрами;

ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; E_2 – единичная (2×2) матрица.

Как вариант, можно построить двух-этапную процедуру идентификации, как это предложено в [15].

Закон управления с учетом оцениваемых параметров объекта управления вместо их действительных величин имеет вид

$$\hat{T} \dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -a_{\text{м1}}^{-1} [a_{\text{м0}} (\hat{x}_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \phi - \hat{a}_3^V], \quad (9)$$

где $\hat{T} = -\hat{a}_1^V / a_{\text{м1}}$; $\hat{x}_{\text{гр}} = \int_0^t V_{\text{упр}}(t) dt + \hat{I}_{30\%} \phi$.

Как показано в [11, 13], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям:

$$\begin{aligned} \text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); \\ |\hat{a}_1^V| / 2 \leq \hat{a}_1^V \leq |\hat{a}_1^V|_{\text{max}}; \quad d\hat{a}_1^V / dt \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $|\hat{a}_1^V|_{\text{max}} \geq 2|\hat{a}_1^V|$ – верхнее ограничение указанной оценки, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления (поэтому эта оценка выбрана постоянной, с экспериментальным выбором максимального ее значения).

В силу быстрой сходимости невязки идентификации в алгоритме (8) буквально с первых шагов работы алгоритма (доказательство см. в [13]), уравнение объекта управления (4) можно переписать как

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx \hat{a}_1^V \dot{V} + \hat{a}_2^V \phi + \hat{a}_3^V.$$

Макет мостового крана. Для возможности исследования существующих и отладки новых способов управления краном на реальном объекте управления был собран макет, полностью повторяющий динамику движения грузоподъемных кранов мостового типа [16]. Собранный макет крановой установки представлен на рис. 2.

Размеры установки: длина 1250 мм, ширина 250 мм, высота от 1000 до 1400 мм. Высота макета регулируется за счет раздвижной конструкции ножек. Рабочий ход тележки составляет 1200 мм, максимальная высота подъема груза от пола – 1300 мм.

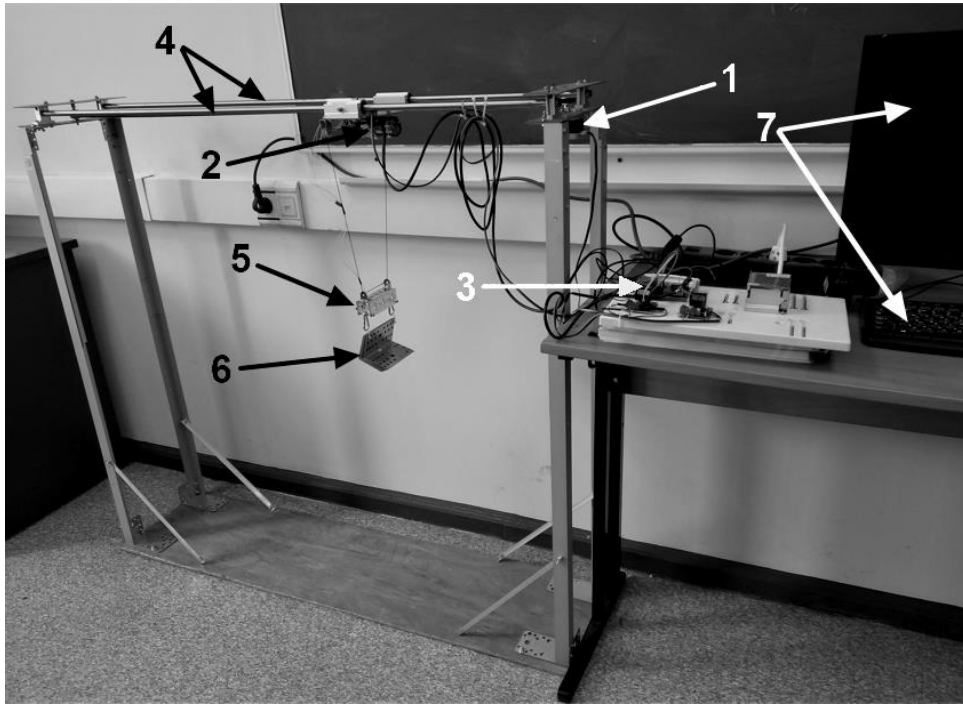


Рис. 2. Макет мостового крана: 1 – привод тележки; 2 – привод подъемного механизма; 3 – одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+; 4 – цилиндрические направляющие; 5 – датчик угловой скорости GY-521 (на фотографии не видно); 6 – транспортируемый груз; 7 – монитор и клавиатура для управления одноплатным компьютером

В качестве привода тележки используется шаговый двигатель NEMA 17 со следующими характеристиками: момент удержания 4,8 кг-см; ток 2,5 А; угловой шаг 1,8 град/импульс. Двигатель расположен на неподвижной раме крановой установки. Поступательное движение от двигателя к тележке передается за счет зубчатого ремня, который натягивается с разных сторон макета с помощью зубчатых колес. С одной стороны зубчатое колесо расположено на валу шагового двигателя, с другой стороны – на неподвижной оси.

Тележка крана передвигается по двум стальным цилиндрическим осям диаметром 12 мм посредством линейных подшипников качения серии SCL.

Мотор редуктор, используемый для поднятия и опускания груза, закреплен на нижней части тележки. На его валу расположено колесо, которое наматывает леску с грузом. Мотор редуктор включает в себя электродвигатель постоянного тока с напряжением питания 12 В и планетарный редуктор, все узлы собраны в едином корпусе.

В качестве контроллера используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+ с установленной операционной системой Raspbian [16]. Для определения угла отклонения троса от вертикальной оси

и линейного ускорения используется датчик GY-521 [18], построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и линейные ускорения по трем осям. Датчик установлен на 3 см выше места крепления груза.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 3. На ней изображены все основные компоненты управления. Контроллер осуществляет сбор данных с датчика GY-521 и принимает команды оператора, которые задаются с компьютера. Далее после обработки полученной информации формируются управляющие сигналы на модули управления двигателями постоянного тока L298N, с которых, в свою очередь, осуществляется управление приводами тележки и подъемного механизма. Персональный компьютер необходим для удаленного подключения к Raspberry Pi.

Программный код алгоритма управления написан на языке высокого уровня Python. Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма управления краном представлена на рис. 4, где используются следующие обозначения: $t_{\text{тек}}$ – период пройденного времени с начала работы алгоритма; $t_{\text{зад}}$ – заданное время работы алгоритма.

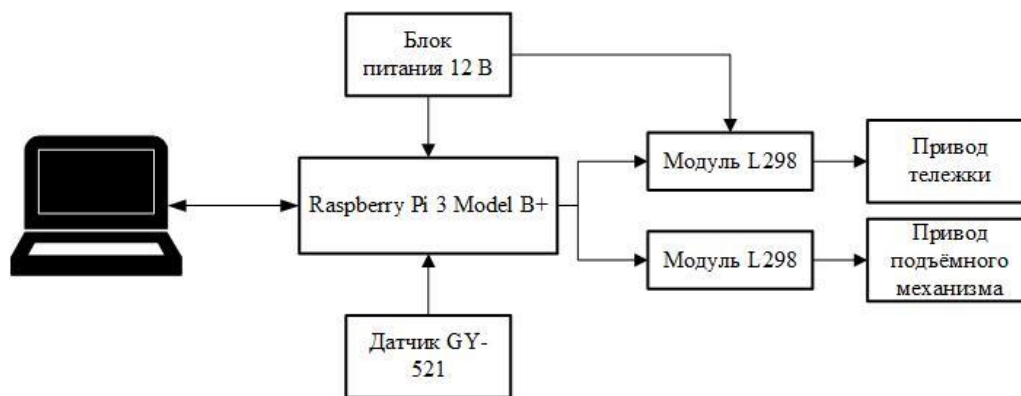


Рис. 3. Структурная схема системы управления макетом мостового крана

В процессе управления крановой установкой производится запись следующих переменных: расстояние, пройденное тележкой; расстояние, пройденное подвешенным грузом; значение угла отклонения троса от вертикальной оси; управляющий сигнал. Запись значений производится в виде вектора состояний (например, $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$). Для удобства анализа результатов работы системы на основе полученных векторов состояний строятся графики их значений от времени с помощью библиотеки Matplotlib¹.

В рамках отладочных работ для улучшения качества управления в алго-

ритм добавили дополнительное условие, при котором будет производиться текущая идентификация оценок параметров объекта управления, а также комплементарный фильтр первого порядка, предназначенный для определения $\ddot{x}_{гр}$ по показаниям акселерометра и датчика угловой скорости. Ввиду того что при приближении груза к заданной точке поведение объекта управления становится близко к линейному, текущая идентификация в этот момент отключается. А в вычислении $V_{упр}$ используются оценки, полученные на предыдущих итерациях.

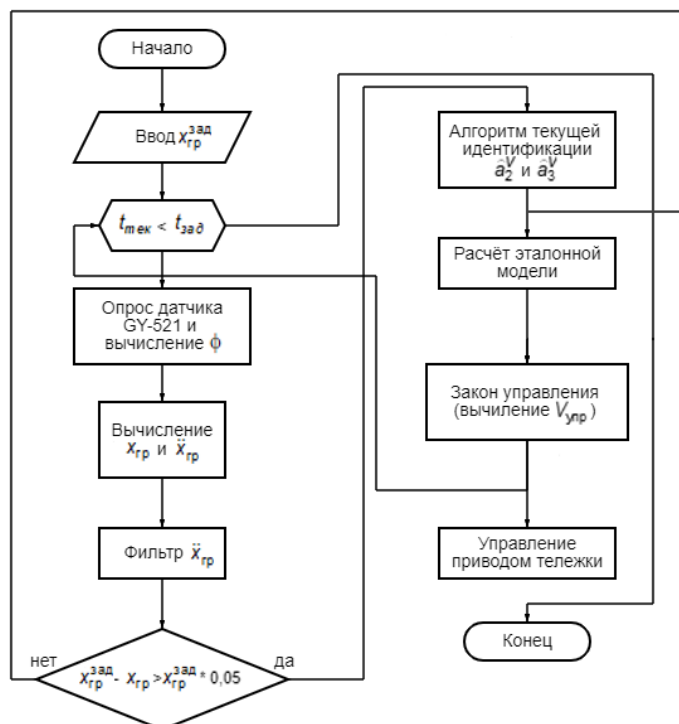


Рис. 4. Блок-схема алгоритма адаптивного управления макетом мостового крана

¹ https://jhub2.jinr.ru/user/anikina/notebooks/Project_School_Matplotlib_original.ipynb#

Результаты исследования. Исследование системы управления на макете мостового крана производилось с различными вариантами параметров груза и длины троса: $m_2 = 1,05$ кг и $m_2 = 0,7$ кг, $l = 0,61$ м и $l = 0,3$ м. Длина троса в течение одного исследования постоянна. Масса тележки $m_1 = 0,85$ кг. Значение ϕ определялось интегрированием измеренного $\dot{\phi}$. Определение переменной x осуществляется по количеству сформированных управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки). Момент инерции грузов рассчитывался согласно [19].

Параметры эталонной модели (5): $\xi_M = 0,9$; $\omega_M = 1,92$ с⁻¹. Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 0,5$ м. Параметры алгоритма иден-

тификации (8) и (9): дискретный момент времени зависит от времени прохождения одного цикла управления; средние значения составляют $\Delta t = 0,01$ с; $\hat{a}_1^V = 0,0334$; $\vartheta = 100$; $\beta = 0,993$.

Параметры эталонной модели и алгоритма идентификации во время всех исследований не изменялись.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений в каждом исследовании по завершении переходного процесса кратковременным импульсным воздействием вновь раскачивали груз.

На рис. 5–8 представлены результаты исследования адаптивной системы управления при различных параметрах.

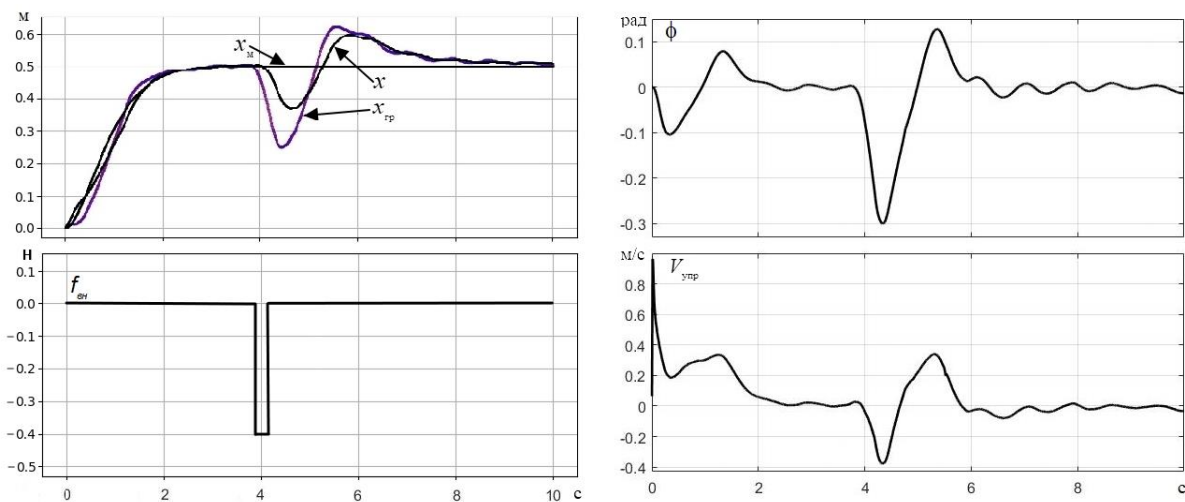


Рис. 5. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011655$ кг·м², $l = 0,61$ м

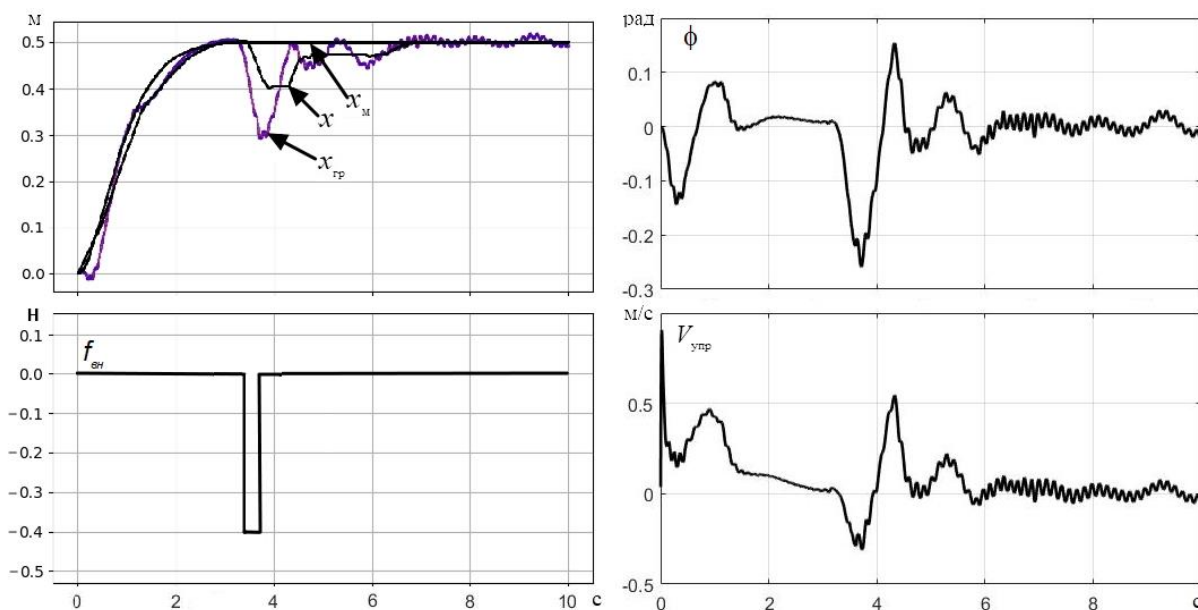


Рис. 6. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011343$ кг·м², $l = 0,30$ м

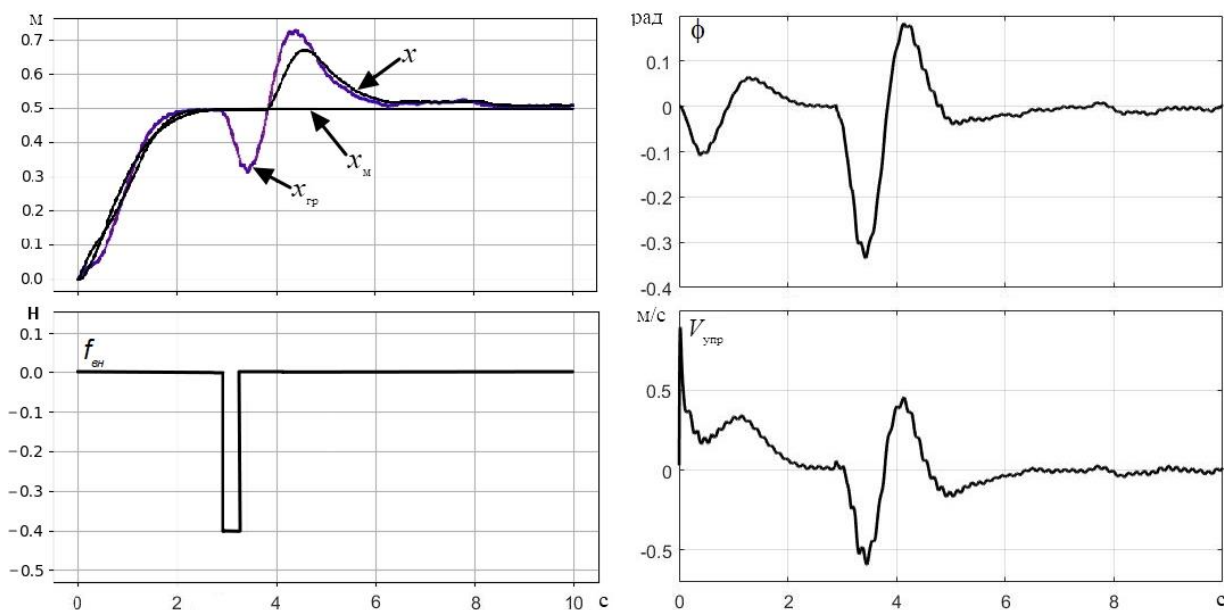


Рис. 7. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011343$ кг·м², $l = 0,61$ м

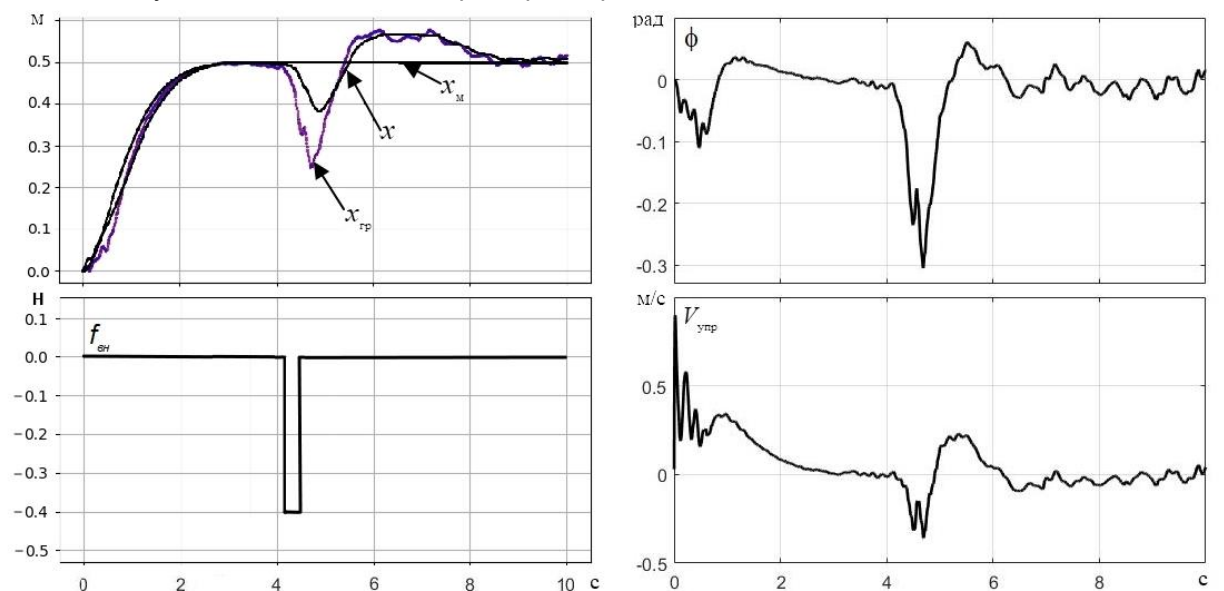


Рис. 8. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 0,7$ кг, $J = 0,000379$ кг·м², $l = 0,3$ м

Результаты исследования адаптивной системы управления на макете мостового крана подтверждают ее работоспособность. Характеристики переходного процесса схожи с теми, что были получены в [11] при исследовании системы управления в программной среде Matlab Simulink.

Также стоит отметить, что при изменении массы груза, его момента инерции и длины подвеса характеристики переходного процесса менялись незначительно. А внешнее импульсное возмущение парировалось за короткий промежуток времени (не более 4,2 с).

Выводы. Представленный адаптивный закон управления мостовым краном с управлением тележкой крана по скорости перемещения и отслеживанием текущего положения груза требует минимальных начальных настроек и способен подстраиваться в текущий момент времени под реальные характеристики объекта управления и внешних неконтролируемых возмущений.

В рамках данного исследования была настроена аппаратная часть экспериментальной установки, разработан алгоритм предлагаемого адаптивного закона управления на языке высокого уровня Python с опросом и обработкой данных с датчиков

обратной связи, с возможностью строить графики зависимостей необходимых переменных от времени. Результаты исследования на экспериментальной установке полностью совпали с результатами ранее проведенных имитационных компьютерных исследований, что подтверждает эффективность предложенного способа управления.

Система обеспечивает точное перемещение груза за малый промежуток времени, демпфирует маятниковые колебания груза при разгоне и торможении тележки, а также при внешних импульсных возмущениях. Переходный процесс составил не более 3 с при различных параметрах груза и длине подвеса.

Анализ полученных графиков показывает, что при перемещении груза с длиной подвеса 30 см появляются высокочастотные колебания, которых при исследовании в [11] не наблюдалось. Данные колебания передаются на датчик GY-521 от провода, к которому он подключен, на самом же грузе подобные колебания отсутствуют. Однако на качество управления в целом это не повлияло.

Список литературы

1. **Щедрин А.В., Сериков С.А., Колмыков В.В.** Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 13–17.
2. **Корытов М.С., Щербаков В.С., Шершнева Е.О.** Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 1(53). – С. 12–19.
3. **Рогова Н.С., Юркевич В.Д.** Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3. – С. 43–54.
4. **Антипов А.С., Краснова С.А.** Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 609–614.
5. **Ухоботов В.И., Величко В.С.** Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечеткого алгоритма управления // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 18–23.
6. **Петренко Ю.Н., Алави С.Э., Александровский С.В.** Исследование работы крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 3. – С. 20–25.
7. **Saeidi H., Naraghi M., Raie A.A.** A neural network self tuner based on input shapers behavior for anti sway system of gantry cranes, J. Vib. Control. – 2013. – No. 19. – P. 1936–1949.
8. **Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system**, J. Vib. / L. Lee, P. Huang, Y. Shih, et al. // Control. – 2014. – № 20. – P. 749–760.
9. **Boustany F., d'Andrea-Novel B.** Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. – 1992. – P. 1963–1968.
10. **Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В.** Сравнительный анализ методов управления мостовым краном // Электронный научный журнал «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами». – 2019. – Т. 4. – С. 29–39.
11. **Круглов С.П., Аксаментов Д.Н.** Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682–688.
12. **Черноустько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А.** Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
13. **Круглов С.П.** Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland, 2012. – 125 с.
14. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
15. **Пат. на изобретение RU 2231819 С2.** Адаптивная система управления с двухэтапным идентификатором и неявной эталонной моделью / В.Н. Буков, С.П. Круглов, А.М. Бронников, Р.А. Сегедин; Приоритет 13.02.02.; опублик. 27.06.04, Бюл. № 18.
16. **Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В.** Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 288–292.
17. **Петин В.А.** Микрокомпьютеры Raspberry Pi. Практическое руководство. Сер.: Электроника. – СПб., 2015. – 240 с.
18. **Акселерометр и гироскоп MPU6050:** первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов, Н.О. Кондратьев и др. // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3(25). – С. 9–22.

19. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука, Механика, 1979. – Т. 1. – 3-е изд. – 520 с.

References

1. Shchedrinov, A.V., Serikov, S.A., Kolmykov, V.V. Avtomaticheskaya sistema uspokoeniya kolebaniy gruzha dlya mostovogo kрана [Automatic load vibration calming system for overhead crane]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 13–17.
2. Korytov, M.S., Shcherbakov, V.S., Shershneva, E.O. Obosnovanie znacheniy koefitsientov regulyatorov gasheniya kolebaniy gruzha mostovogo kрана [Substantiation of values of factors of bridge crane cargo vibration damping regulators]. *Vestnik SibADI*, 2007, no. 1(53), pp. 12–19.
3. Rogova, N.S., Yurkevich, V.D. Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshcheniya gruzha portal'nym kранom [Development of control algorithms for moving load by a portal crane]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 2015, no. 3, pp. 43–54.
4. Antipov, A.S., Krasnova, S.A. Sistema stabilizatsii polozheniya telezhki kрана s ispol'zovaniem sigmoidal'noy funktsii [System for stabilizing the position of the crane truck using the sigmoid function]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614.
5. Ukhobotov, V.I., Velichko, V.S. Stabilizatsiya matematicheskogo mayatnika s osnovaniem na kolese s pomoshch'yu nechetkogo algoritma upravleniya [Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm]. *Vestnik YuUrGU*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 18–23.
6. Petrenko, Yu.N., Alavi, S.E., Aleksandrovskiy, S.V. Issledovanie raboty kрана s kontrolerom nechetkoy logiki na osnove trekhmernoy imitatsionnoy modeli [Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model, Energy]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2011, no. 3, pp. 20–25.
7. Saeidi, H., Naraghi, M., Raie, A.A. A neural network self tuner based on input shapers behavior for anti sway system of gantry cranes, *J. Vib. Control*, 2013, no. 19, pp. 1936–1949.
8. Lee, L., Huang, P., Shih, Y., Chiang, T., Chang, C. Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system, *J. Vib. Control*, 2014, no. 20, pp. 749–760.
9. Boustany, F., d'Andrea-Novell, B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris, 1992, pp. 1963–1968.
10. Aksamentov, D.N., Kruglov, S.P., Kovyrsin, S.V. Sravnitel'nyy analiz metodov upravleniya mostovym kранom [Comparative analysis of bridge crane control methods]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami»*, 2019, no. 4, pp. 29–39.
11. Kruglov, S.P., Aksamentov, D.N. Metod adaptivnogo upravleniya mostovym kранom s pryamym otslezhivaniem peremeshcheniya gruzha [A method of adaptive control of an overhead crane with direct tracking of the load movement]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, no. 21(12), pp. 682–688.
12. Chernous'ko, F.L., Anan'evskiy, I.M., Reshmin, S.A. *Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami* [Control methods of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 328 p.
13. Kruglov, S.P. *Usloviya adaptiruemosti sistem upravleniya s identifikatorom i etalonom* [The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a benchmark]. Moscow: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland, 2012. 125 p.
14. L'Yung, L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* [System Identification: Theory for the User]. Moscow: Nauka, 1991. 432 p.
15. Bukov, V.N., Kruglov, S.P., Bronnikov, A.M., Segedin, R.A. *Adaptivnaya sistema upravleniya s dvukhetapnym identifikatorom i neyavnoy etalonnoy model'yu* [Adaptive control system with two-stage identifier and implicit reference model]. Patent RF, no. 2231819 C2, 2004.
16. Aksamentov, D.N., Kruglov, S.P., Kovyrsin, S.V. Ustanovka po issledovaniyu algoritmov uspokoeniya kolebaniy gruzha mostovogo kрана [Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*, 2019, vol. 2, pp. 288–292.
17. Petin, V.A. *Mikrokomp'yutery Raspberry Pi. Prakticheskoe rukovodstvo. Elektronika* [Raspberry Pi microcomputers. Practical guide]. Saint-Petersburg, 2015. 240 p.
18. Zhmud', V.A., Kuznetsov, K.A., Kondrat'ev, N.O., Trubin, V.G., Trubin, M.V. Akselerometri i giroskop MPU6050: pervoe vklyuchenie na STM32 i issledovanie pokazaniy v statike [Accelerometer and gyroscope MPU6050: the first inclusion on the STM32 and the study of readings in static]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 2018, no. 3(25), pp. 9–22.
19. Sivukhin, D.V. *Obshchiy kurs fiziki* [General course of physics]. Moscow: Nauka, Mekhanika, 1979, vol. 1, no. 3. 520 p.